高精密电容介损测试

KMSB-30 型高压电桥

使用说明书

上海熙凌电器有限公司

Shanghai SCHERING Electric Co.,Ltd

二零零七年一月

目 录

第一章 概 述 3
1—1 简 介 3
1—2 性 能 3
1—3 结 构 3
1—4 技术指标 3
第二章 安 装 5
2—1 验收检查 5
2—2 安 装 5
2—3 初步调试 5
第三章 操 作 5
3—1 外形结构介绍 5
3—2 电容测试 7
A 准备工作 7
B 电容及损耗角正切值 tgδ的三端测量 7
C 电容及损耗角正切值 tgδ的四端测量 8
D 电压变压器（或互感器）的校验 10
E 电感测量 11
F 仪器自校 12
第四章 工作原理 14
4—1 电流比较仪 14
4—2 电容电桥 14
4—3 电感测量 18
4—4 内部数据处理 20
第五章 仪器成套性 20
第六章 保管及免费修理期限 21

第一章：概　述

1—1　简介：

本说明书是 KMSB30 型高压电容电桥的安装和使用说明书。（包括 KMSB30-3 型量程扩展器及 TPμP-A 型打印机）。

KMSB30 型高压电容电桥是基本仪器。主电桥主要采用电流比较仪的原理并结合计算机数据处理，具有操作方便可靠，测量精度高、读数位数多、线性度好，不受环境温湿度影响，仪器内部的计算机能自动对测试数据进行处理，直接在面板上显示电容值及介损 tgδ和测试电压及流经标准电容的电流（Icn），并可通过打印机将测试结果打印出来等优点，是目前国内精度较高、稳定性好、操作方便、用途广泛的高压电桥。

1—2　性能：

KMSB-30 型高压电桥为实验室精密型高压电桥。主要采用电流比较仪的原理，使它在测量上具有较高的比率精度和稳定性，这是一般西林电桥不能达到的。再加上计算机数据处理，使测量更加直观。本电桥可与各类高压标准电容器配合组成高压电容电桥，适宜于在高电压下测量电力电缆、高压套管、电力电容器、互感器等高压电力设备的电容量及损失角正切值 tgδ，以及各种固体或液体绝缘材料的介电常数（ε）及损失角正切值，也可测量高压变压器或电压互感器的比差及角差。电桥可外接电流互感器以扩大量程，测量大电容本电桥为四端测量具有引线补偿装置，使测量精度提高，消除接线电阻引起的附加误差。本电桥还可测量电抗器的电感量及 Q 值。

KMSB30-3 型量程扩展器（供选购）能使主桥体的电容比从 1000∶1 扩大到 10^6∶1。

1—3　结构：

本电桥放在一个金属箱体内，指零仪安放在适宜人眼观察的水平位置。灵敏度调节开关在表头的旁边，桥体安放在指零仪下面，电容比值和介质损耗正切值读数调节开关固定在面板上。在主桥体与指零仪的之间，是被测试品的电容量及介损、测试电压的显示窗，在其旁边是标准电容量的预置盘。电桥本体的环形电流比较仪装在一个磁屏蔽盒内，它的铁芯采用超高导磁材料卷绕成环形，为内外磁场有较好的抗干扰性能，具有很高精度的比差及角差。主运算放大器和引线补偿放大器及微机处理器都在箱体内部一个金属屏蔽盒内，电桥工作电源采用了开关电源，具有很宽的工作范围，也安装在一个金属屏蔽盒内。

连接标准电容器与被测试品的插座在仪器背部，接地端钮前后共有两处，外接线采用屏蔽电缆，电桥装置箱体作为静电屏蔽以免干扰。

1—4 主要技术指标：

●电桥电容比 Cx / Cs（当额定比率为 1:1 时）为 0 到 1.111110，步级 0.000001，倍率（K）变化范围为 1000、500、200、100、50、20、10、5、2、1 共十档，电容的测量范围决于标准电容器 Cs 的大小电容值，即

$$Cx = Cs \cdot K \cdot (Cx / Cs)$$

●电容比率值的测量准确度：

电容比率读数第一只盘为满度时应不大于

当　$tg\delta < 3\times10^{-3}$　　为 ±0.00005

tgδ≥3×10^{-3} 为 ±0.00005±0.005×tgδx。

●电桥 tgδ范围为 -0.111110 到＋0.111110，步级为 0.000001。

● tgδx 测量准确度不大于±0.5%tgδx±5×10^{-5}

●被测电容量显示：Cx＝（0.1~1111.1110）Cn
显示为被测电容量的前 6 位有效数字。

●被测电容介损显示：tgδ＝-1.11x10^{-1}到 1.11x10^{-1}
显示为被测电容介损的前 3 位有效数字并结合科学记数法。

●电容量及介损显示精度：
电容量： ±0.5%×tgδx±0.00005。

介 损： ±0.5%tgδx±5×10^{-5}

●电桥最大工作电流：电桥标准臂最大允许电流为 15mA。通过被测臂最大电流与倍率位置有关，见表 1。

表 1

倍 率K	最大允许电流
1	15mA
2	30mA
5	75mA
10	150mA
20	300mA
50	750mA
100	1.5A
200	2A
500	2A
1000	2A

注意：被测最大不得超过 2A，如测试需要则需外接电流互感器。

●分辨率：当通过标准电容器的电流为 0.1mA 时，且电容比率读数第一只盘为满度时，在电桥完全平衡时，其电容比及介损盘的分辨率均为 5×10^{-5}。

●标准电容量预置范围：0000.00 到 1999.99pF

●电桥内有过电压保护措施，氖泡起辉电压不超过交流 30 伏。

●试验电压显示：范围 0 到 499.9kV
分辨率为 0.1kV
准确度 ±5%tgδx±5 个字

●电桥内附指零仪，其主要技术特性如下：

1. 电压灵敏度 2μV / 格。
2. 输入阻抗 80kΩ。
3. 三次谐波抑制 -60dB。

注：以上的所有技术指标都是在基本测试频率 50±0.2Hz 下的。

●电源电压为 220V 允差 10%，频率为 50±2Hz 消耗功率约 40W。
电压频率为 50±0.2Hz

●外形尺寸：560（宽）*410（深）*390（高）毫米。

●重量：约 35 公斤。

●KMSB30-3 型量程扩展器（外接，供选购）主要技术指标：

a．次级 1000 匝、初级 100 匝、辅助 1000 匝，具有供串绕线匝的窗口。

b．比值和最大电流的额定值：

（当电桥量范在 1000:1 时)：10,000:1　10 安　量程扩大器上可以使用

100,000:1　100 安　串绕 10 箍

1000,000:1　1000 安　串绕 1 箍

(用串绕箍数,可得中间比值。)

c．精度：(当电桥量范在 1000:1 时）　$\pm 1 \times 10^{-5}$

●TPμP-A 打印机的主要技术指标：

1．打印宽度：40 字符/行。

2．打印速度：0.4 行/秒。

3．打印纸：57.5mm 宽，40mm 直径的普通白纸纸圈。

4．外形尺寸：111×62×128（mm）

第二章：安　装

2—1　验收检查：

在出厂前,仪器进行了彻底的机械和电气检查,其中包括了一段时间的老化，最后经过严格的检验，合格后才出厂的。所以在收到仪器时，仪器不应该有损伤和故障。然而，由于运输过程中可能会发生问题，固用户在收到仪器后应首先检查是否有结构上的损伤，并尽快的进行电气试验。如发现问题，用户应马上与本公司联系，切勿自行开机处理。

2—2　安装：

将电桥安放在牢固的操作台上，首先将电桥的接地端与大地可靠的连接好，然后把仪器的电源线插到适合的电源上。

2—3　初步试验：

●将标准电容预置盘调整到目前所使用的标准电容量的数值。

●将电源开关打开，指另仪的指针会向上摆动一下，然后再回到另位。同时显示窗口回有显示、打印机会发出打印马达的声音，然后打印机的在线指示灯会亮。

●调节电容比率盘到 0.555555，介损盘到 0.005555，此时电容显示窗应显示标准电容量预盘的数值与电容比率盘的乘积的前 6 位有效数字；介损显示窗应显示：“5.55-3”。

●观察实验电压显示窗：应为“000.0”，按下‘DC’按钮，应显示“00.00”。

第三章　操　作

3－1 外形结构介绍：

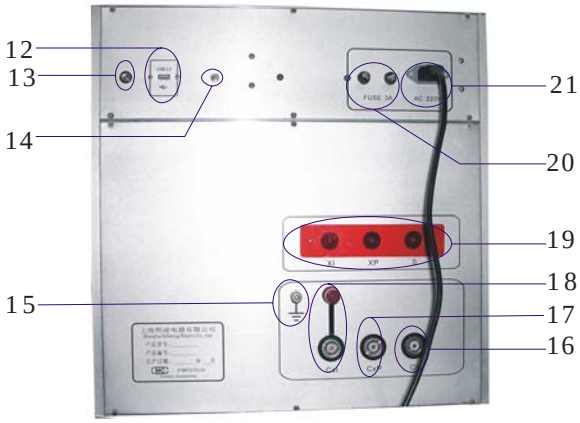
前面板见图，后板连接器插头见下图

序号　　功能

1. 被测电容显示窗，可直接读取被测试品的电容量

2. 介质损耗显示窗，显示被测试品的介损耗正切值
3. 电源按钮开关，揿下接通电源，红灯亮。
4. 指零仪表头：平衡时表针指零，使用时不要使表头指针超满偏，以免损坏。在测量接线完毕后，缓慢升起电压，如接线的屏蔽、接地良好，那么指零仪的灵敏度开关在零位时，指针指示也应该为零。通过此可检查屏蔽和接地是否良好，如发现指针与试验电压一起在升高，必须马上切短高压，检查测量回路接线、倍率开关位置是否合适。
5. Cx 倍率转换开关（K）：共有十档量程。
6. 电容比率调节平衡盘（Cx/Cn）：共六位读数，平衡后直读电容比率值。
7. 损耗角正切 tgδ 平衡调节盘，共有六位读数（最小达 10^{-7}）。
8. 灵敏度转换开关：共有 6 档，调节平衡时逐渐增大灵敏度，直到所需要的读数分辨率为止。
9. 标准电容量预置盘：电桥内部的计算机将通过这里给定的标准电容量的值，对所测试的结果进行数据处理，然后在‘序 25’‘序 26’上显示出被测试品的电容量及介质损耗值。
10. 试验电压显示窗：能在高压试验时显示试验电压，单位为 kV。
11. 试验电压频率显示窗：用以观察试验电压的频率。、
12. USB 接口：用于数据传送。（需要在定货时特别加定，否则普通机器不带）
13. 试验电压显示微调电位器：在试验时如发现显示的试验电压与实际电压误差过大，可通过调节此电位器，来调整所显示的电压值，倘若有一些误差不会影响测量精度。一般情况在出厂时已调整，故操作人员可不用调节。
14. 介质损耗角正 tgδ “＋”“－”选择开关：当被测 tgδ 大于标准 tgδ 时置于“＋”；当被测 tgδ 小于标准 tgδ 时或测电抗器时置于“－”。
15. 仪器接地端：试验时必需将此点可靠接大地。
16. Cs 插孔：接标准电容器。
17. Cxp 插孔：被测 Cx 电位插孔，四端测量大电容时为被测电位端。

前面板



后面板

18. CxI 插孔：被测 Cx 电流插孔，三端测量时为被测端，四端测量时为被测电流端。
19. 放电管：起辉电压不大于 50Hz 交流、30 伏。
20. 电源保险丝：1.5A — 2
21. 工作电源输入：220V/50Hz。

注　　意：

在加电压试验前，电桥必须可靠的与大地连接，灵敏度开关必须回另位，否则在试验时电桥会发生过大的不平衡，造成指另仪的指针过分偏转而损坏。一般可在外回路没有施加任何电压的条件下，进行初次平衡。因为本仪器的高灵敏度能使系统在周围始终存在的电磁场下得到利用。

流经标准电容器及被测电容器的电流必须符合技术指标的要求。以防止电流比较仪的线路损坏。

3—2　电容测试：

A．准备工作：

先将此盘示值调节到所使用的标准电容器的实际电容量值。然后将接地端钮与大地可靠连接，电源线接到合适的电源上，指另仪的灵敏度开关置另。最后按下按钮接通电源，红灯亮。

B．电容及损耗角正切值 tgδ的三端测量

(1) 在标准电容侧的最大电流不得超过 15mA（特殊订货可达 30mA），在试验时应引起注意。为了获得最大的分辨率，Ics 不应小于 1mA。

(2) 用专用测量电缆线将标准电容接到电桥背面 C s 插座，被测试品接到 CxI 插座见图 9 。

(3)将倍率开关置于相应的位置上，再将 Cx 测量型式开关（图 1 序 8）置于“3”（三端测量）。

(4)接线完毕后，缓慢升起电压，如接线的屏蔽、接地良好，那么指另仪的灵敏度开关在另位时，指针指示也应该为另。通过此可检查屏蔽和接地是否良好，如发现指针与试验电压一起在升高，必须马上切短高压，检查测量回路接线、倍率开关位置是否合适。

(5)在未加试验电压之前，逐渐增加灵敏度，利用电桥的高灵敏度而进行初步平衡，寻找出一接进平衡的数值，以避免施加试验电压后由于极大不平衡而造成的困难。

当 Ins 指示 1mA 时即当 Cs＝100pF 试验电压应为 30kV 时，本电桥分辨率无论是电容比值或 tgδ均能达到 $1x10^{-6}$，倍率选择可按表 3 所示预置。

表 3

Cx	Cs	倍率(K)	读数盘
100pF	100pF	1	6
200pF	100pF	2	6
500pF	100pF	5	6
1000pF	100pF	10	6
2000pF	100pF	20	6
5000pF	100pF	50	6
10000pF	100pF	100	6
20000pF	100pF	200	6
50000pF	100pF	500	6
100000pF	100pF	1000	6

若标准电容为 1000pF 则被测相应增大 10 倍

例 1　　如果　Cx＝400pF　　Cs＝100pF

倍率 K 置于“5”

则测量盘 Cx/Cs 读数为 0.800000

例 2　　如果　Cx＝30pF　　Cs＝100pF

倍率 K 置于“1”

则测量盘 Cx/Cs 读数为 0.300000

如果被测电容器的值不知道，开始时最好将测量计数盘置于 0.500000 的位置，然后改变倍率 K，使指零仪指向较小的偏转，增大灵敏度进一步调节读数盘使电桥逐步平衡，然后计得被测值，若要获六位读数按此被测容量值，选择适当的倍率 K。

(6)施加试验电压逐渐增大灵敏度，反复调节 Cx/Cs 读数盘及 tgδ读数盘直到指零仪表头指针指于零点。此时电桥达完全平衡，只需满足使用者所需要的读数能分辨即可，不一定要将灵敏度置于最大“ 6 ”档。

此时电容量及介损显示窗将显示被测的电容量及介损值。

还可根据电桥的的测量盘示值，来计算。

被测电容值按下式计算：

$$Cx = K\ Cx/Cs\ Cs \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (26)$$

其中：K ----- 倍率开关指示值

Cx/Cs ----- 电桥读数

Cs ----- 标准电容实际值

电桥 tgδ盘读数即为被测试品的 tgδ值，但更精确地数值应按下式计算：

$$tg\delta x = A\ tg\delta(读) + tg\delta s \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(27)$$

式中：tgδ(读)--------电桥读数值

tgδs ----------标准电容自身的介损值。

A ---------- f’ / f

（f’：为实际频率、f：50Hz）

C．电容及损耗角正切值 tgδ的四端测量

测量大电容时，电容器的阻抗很小，因此接线阻抗不能忽略。标准电容器的接线阻抗低于标准电容器阻抗的 $1x10^{-7}$，电流比较仪绕组的内部阻抗则为标准电容器阻抗的百万分之几。为了能在测量大容量时，保证测量精度，引线阻抗必须补偿。其接法如图 10 所示。

补偿引线调零步骤如下：

(1)标准电容 Cs 的低压测量端用专用导线接到电桥 Cs 插座。

标准电容 Cs 高压端用另一专用导线（此导线将作为 Cx 电位端的引线）接到电桥 Cxp 插座。

(2)按下电桥电源按钮，电桥 Cx/Cs 数盘置于“ 1 0 ”，倍率开关置于相应的位置。电桥被测 Cx 测量形式开关置于“ 4 ”，标准电容 Cs 选择开关置于与所选用标准电容器电容量相一致的位置（例当使用 1000pF 作标准电容时，此开关置于“1000pF”）。指零仪灵敏度置于“5”或“6”，然后按下 Cx 微调

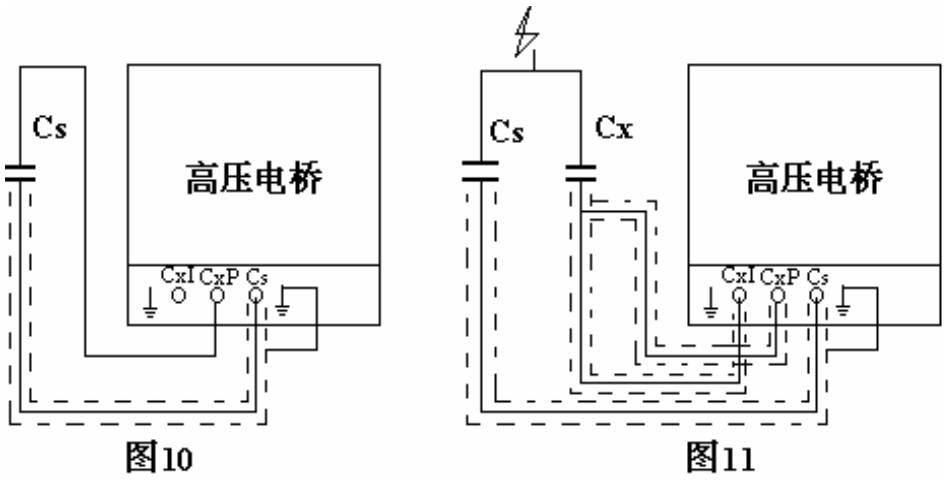


图10 图11

按钮，并用螺丝批调节下面小孔内的微调，使指零仪指针指于零（或最小），此时调零补偿引线结束。

注　意：

当标准电容器的值为 100pF 或 1000pF 这两个数值时，才能进行四端接线补偿。当标准电容器为其它数值时，只能进行三端测量。

(3)按图 11 所示连接被测电容或按图 12 所示连接外接互感器及被测电容。

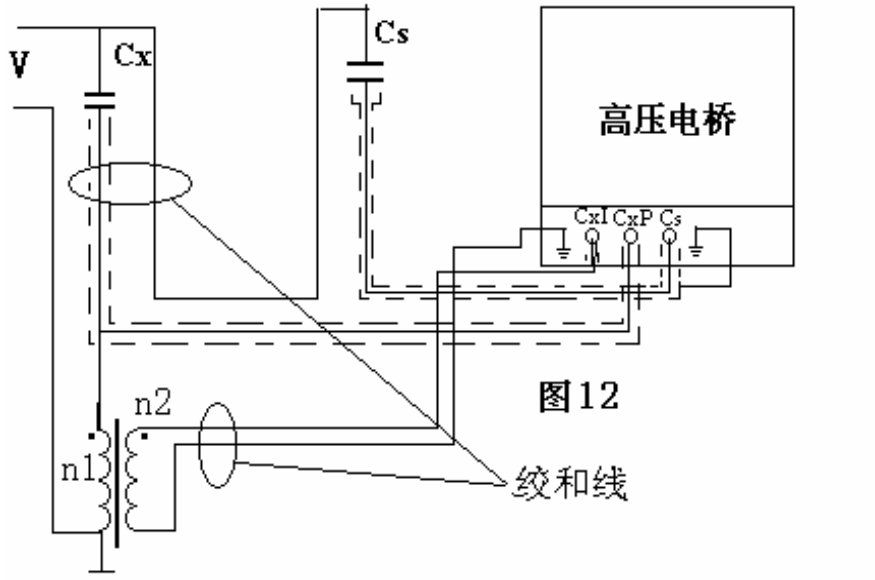


图12

被测电容电流端接互感器初级，一端接大地，CT 次级接到电桥的 CxI 插座及 Cxp 端钮，为了减小互感的影响可采用绞合线或同轴线，被测电容的高压电位端接于标准电容器的高压端，低压端接到电桥的 Cxp 插座，注意外接 CT 初、次级必须是同相端引入，否则电桥不能平衡。

当使用外接 CT 扩展量程的范围可参考下述表 4

如果外接 CT 采用串芯绕组，则串芯线应足够粗，使它与通过被测电容器的电流相符，使用外接 CT，一般电桥倍率位置不能低于“200”，否则产生误差。

(4)按上述步骤完毕后，检查接线是否正确，然后接通试验电压可逐步增加到所需要的电压。

(5)逐渐增大灵敏度到足够分辨读数为止，反复调节电桥 Cx/Cs 及 tgδ盘，使电桥平衡，被测电容的电容量按式（ 1 6 ）计算即：

Cx = C x’ n …… (28)

式中：C x’ ------ 电容显示窗所显示的电容量值

n ----- 外接电流互感器的匝数比

被测 tgδ仍由显示窗直接读得，尚若要求测量精度高则需引入外接电流互感器的比差及角差，前者附加到电容读数，后者附加 tgδ读数。最后也可以将测试结果打印出来。

表四

Cx max		电桥倍率（K）	外接 C、T N2/N 比值	初级流过最大电流 A
Cs=100pF	Cs=1000pF			
0.2uF	2uF	X 200	10	10A
0.5uF	5uF	X 500	10	10A
1uF	10uF	X 1000	10	10A
2uF	20uF	X 200	100	100A
5uF	50uF	X 500	100	100A
10uF	100uF	X 1000	100	100A
20uF	200uF	X 1000	200	200A
50uF	500uF	X 1000	500	500A
100uF	1000uF	X 1000	1000	1000A

D．电压变压器（或互感器）的校验

(1)按图 13 所示连接被测电压变压器和二只 tgδ≤1～ $2X10^{-5}$ 的标准空气（或充气）电容器。

试验电压施加在被测电压变压器的低压端（初级），而被测电压变压器的高压端（次级）接到二只标准电容器的高压端，其中一只标准电容（Cs1）接至 KMSB-30 电桥 CxI 端，另一只标准电容接至 KMSB-30 电桥 Cs 端，接好大地线。

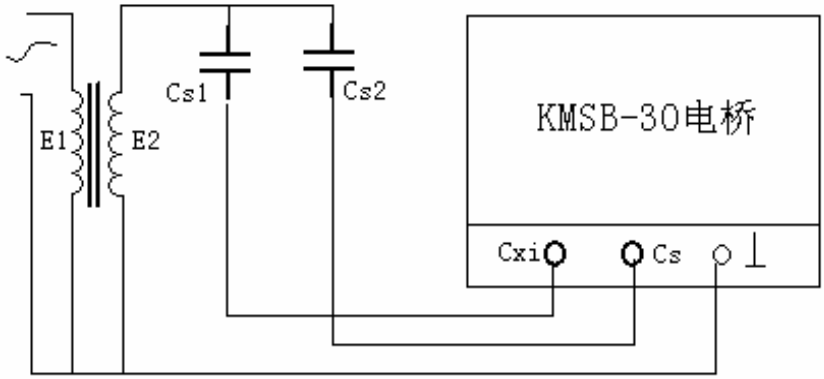


图13

(2)如本节第 3 条测量电容的方法平衡电桥测得电容比值及 tgδ值，记下倍率与电容比值读数的乘积 T1 值及 tgδ读数 D1 值。

(3)再按图 14 所示重新连接电路

被测电压变压器初级接标准电容器 Cs2 高压端，Cs2 测量接至 KMSB-30 电桥 CxI 端。被测电压变压器次级接标准电容器 Cs1 高压端，Cs1 测量端接至 KMSB-30 电桥 Cs 端，接好大地。

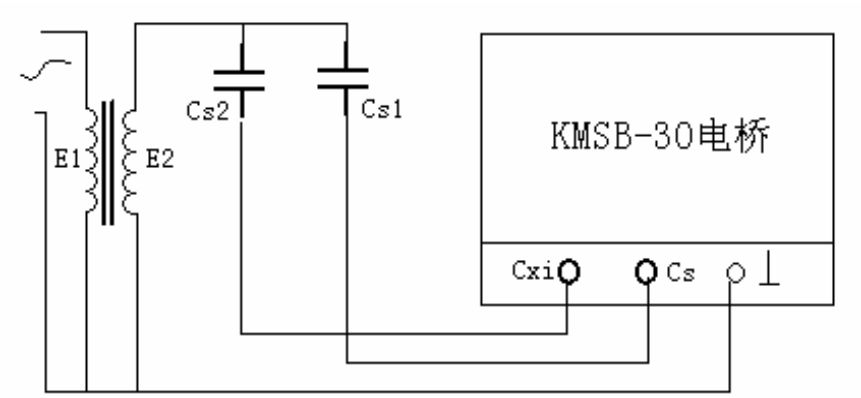


图14

(4)如本节第 3 条测量电容的方法平衡电桥，得到读数，记下倍率与电容比值读数之乘积值 T2 及 tgδ读数 D2 值。

(5)测量计算式：

电压比值　　E2 / E1 = 1 / T1 T2　　…… (29)

即变压器次级与初级之电压比为二次读数乘积的倒数。

电压相位差：　△D = D1 + D2　　……(30)

即为二次读数之和。

注　意：

在二次测量中 Cs1 和 Cs2 电容器位置互换，一般来说 Cs2 等于或大于 Cs1。为了要能读到六位读数，较大的电容必须接在电桥 Cx 一端，从而能使倍率在适当的位置获得足够的分辨率。

在按（29）式计算时，应考虑到 Cs2 的电压系数，这对于高精度测量是需要的。

测量电压变压器比值的典型范围如表 5 所示

表 5

变压器比率	Cs1（pF）	Cs2（pF）	电桥倍率（第一次测量）	电桥倍率（第二次测量）
1	1000	1000	1	1
1000	1000	1000	1	1000
10	1000	100	10	1
1000	1000	100	10	1000
100	5000	50	100	1
1000	5000	50	100	1000

E．电感测量：

带有量程扩展器的电桥能用来测量电抗器（将量程扩展器初极中的电流反向）。方向后的电流无功分量与流过标准电容器的电流同相，电桥可以使用等值电容比的刻度（读数）来获得平衡。

然而，电流的电阻性或同相的分量也被反相，同时介质损耗角也相应成为负值。为此，本电桥具有可反相的 5 位介损。

被测电感接于外接电流互感器初级反相端（非星标端），另一端接大地。互感器次级星标端接 KMSB-30 型 CxI 端，另一端接大地。标准电容器低压端接 KMSB-30 型 Cs 端。电桥接地接好，损耗读数置于“－”，选择适当的倍率（按图１５所示连接），接线连接无误后开启电源，按本说明书所述步骤平衡电桥，得到读数后按式（２１）及（２５）计算被测电感值及Q值。

电感的测量范围如表 6 所示

表6

Cs（PF）	电桥倍率	外接电流互感器比率	电感最大测量值
1000	100	10	7H
1000	1000	1000	7mH
100	100	10	70H
100	1000	1000	70mH

被测电感的 Q 值必须大于 10，否则不能平衡到零。

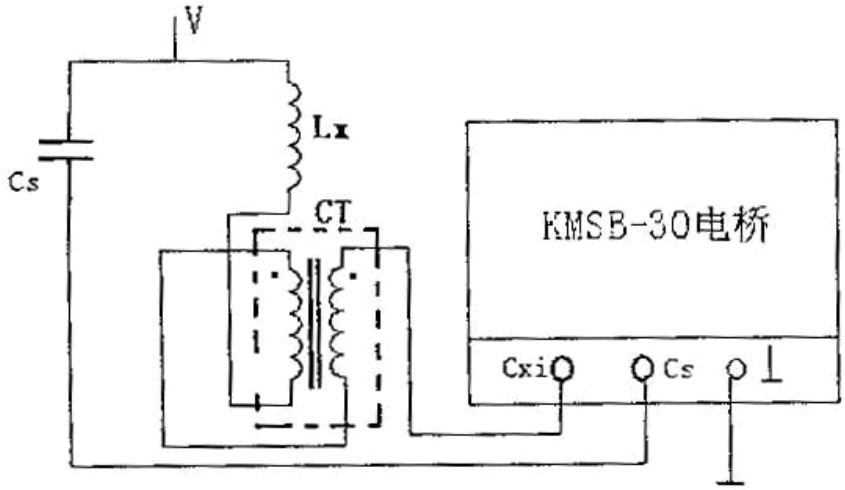


图15

注意：

在上述各种测量中，千万不要忘记电桥本体接地可靠，以免产生危险！

F．仪器自校：

本电桥为高精度电桥，当使用本电桥对测量数据有怀疑时，可对本电桥进行自校，以确定电桥的测量结果是否可靠，同明确定整个系统（包括高压回路）的系统误差。

二只同名义值的标准电容器１００ｐＦ（或１０００ｐＦ），其中一只Ｃs1 接于 KMSB-30 型高压电桥标准Ｃｓ插座，另一只Ｃs2 接于电桥被测ＣxI 插座（如

图 9 示），KMSB-30 高压电桥倍率置“ 1 ”，然后按本说明书三端测量的步骤平衡电桥，取得读数（ Cx/Cs）1 及 tgδ。

然后将Cs1 及Cs2 互换，即Cs2 接电桥Cs 插座，而Cs1 接电桥Cx 插座，电桥比率仍置“ 1 ”，并且与第一次测量同样的电压下再次平衡电桥，取得读数（ Cx/Cs）2 及 tgδ。

二次读数按下述公式计算整个系统的系统误差。

$$\xi = \{ [2-(Cx/Cs-Cx/Cs')]/2 \} x100\% \quad \cdots\cdots(31)$$

$$\Delta tg\delta = (tg\delta 1+tg\delta 2)/2 \quad \cdots\cdots(32)$$

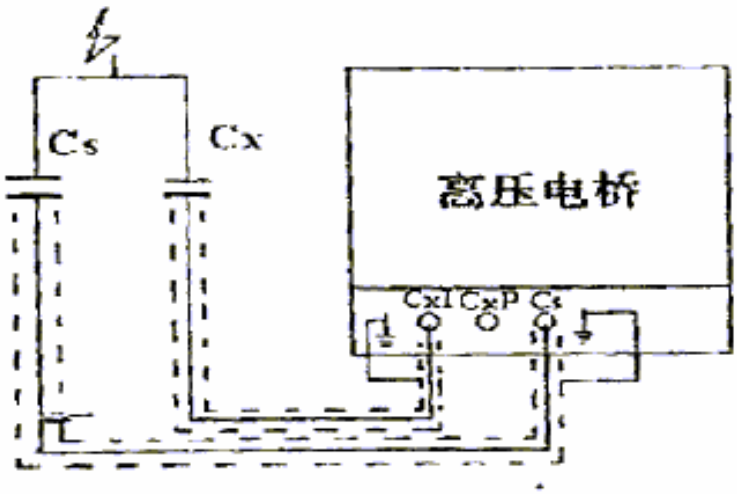
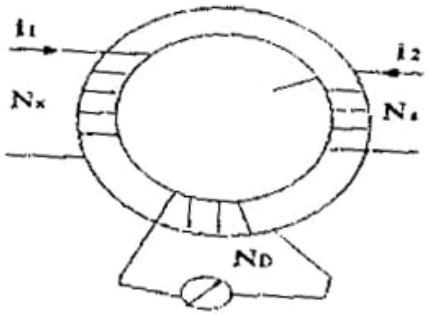


图16

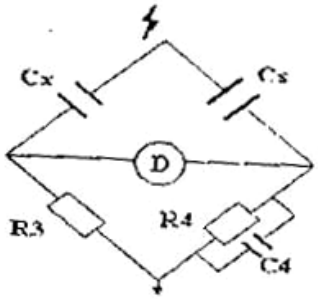
第四章 工作原理

4-1 电流比较仪

电流比较仪是本电侨的“心脏”，它是一只多绕组的环形变压器（见图 2）。取自于同一电源来的电流 i1、i2 分别通过 Nx 和 Ns 绕组，在铁芯内相应的将产生磁通，当二个绕组的安匝数相等且方向相反时，在铁芯内的总磁通为零，此时在检测绕组ＮD 无感应电势，一个高灵敏度的检测器检测这一感应电势，感应电势为零，检测器表头指零。



图二



图三

4-2 电容电桥

电压高于 100Ｖ时，通常测量电容及 tg δ是使用经典的高压西林电桥（见图３）。它容量的测量准确度基本上与低压部分的两个电阻（Ｒ3 和Ｒ4）之比的准确度有关，而“tgδ”测量的准确度与二个电阻的时间常数有关，若在西林电桥上要使小容量的标准电容与一只大容量的电容器相比较就必须要有一个大的电阻比，这二个电 阻之间要继续保持时间常数相等是相当困难的。

电流比较器电容电桥用匝数比来代替电阻比，它有一个相当稳定的 10^{-5}数量级的准确度，比率高达 1000:1 时仍能保持这一准确度。

(1)电容的测量：测量电容的原理如图 4

同一电压Ｕ馈送到二只被比较的电容器上，改变Ｎｓ绕组的匝数直到Ｎｓ的安匝数与Ｎｘ 的安匝数相等而且方向相反，在检测绕组上显示出零磁通， 指零仪指示为零。由于铁芯内没有磁通，Ｎｘ和Ｎｓ绕组的阻抗为零，因此绕组电阻与电容器的电抗相比是可以忽略的。

Ｉｘ和Ｉｓ电流可按下式计算：

$$I_x = j\,u\,\omega\,C_x \qquad \text{.....（1）}$$

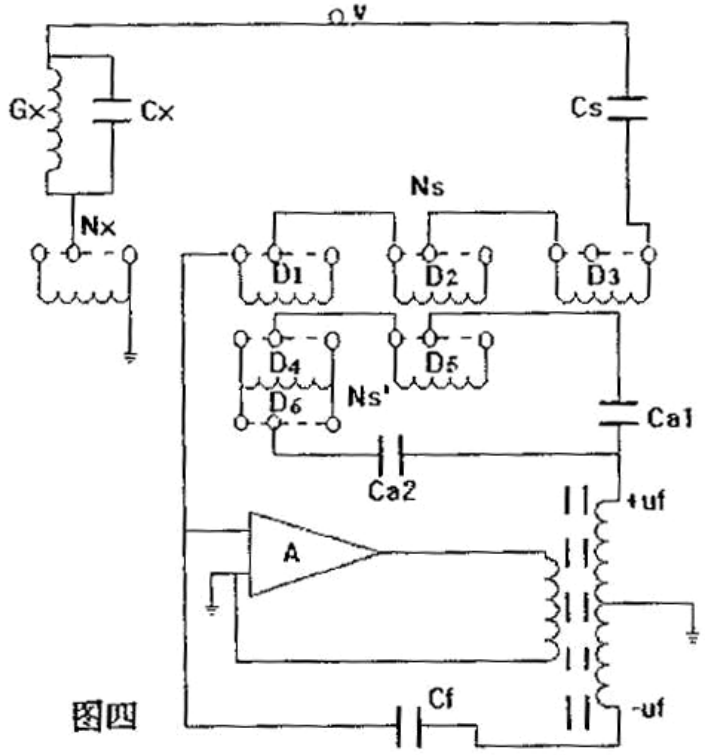
$$I_s = j\,u\,\omega\,C_s \qquad \text{.....（2）}$$

由于安匝平衡则：$I_x N_x = I_s N_s$ .....（3）

将（１）（２）代入（３）式：

$$j\,\omega\,u\,C_x \times N_x = j\,\omega\,u\,C_s \times N_s$$

$$C_x = C_s \times (N_s / N_x) \qquad \text{.....（4）}$$



图四

为了使电桥有宽广的量限，使Nx / Ns 与电容比Cx / Cs 在宽在量限内相等。将Nx 绕组按１、２、５系数抽头， 采用这种方法使比率从１：１扩展到１０００：１，电桥具有六位读数，直接调节Ns 绕组的匝数， 实际上仅保持在前三位（Ｄ１、Ｄ２、Ｄ３），也就是选择 ×１００、×１０、×１的绕组。如要得到六位读数就需要用分数匝，那是不可能的。后三位读数在本电桥中是采用一只比例运算放大器，使它产生一个与试验电压Ｕ成比例且同相位的低电压ＵＦ，这个低电压ＵＦ馈送给低压电容器Ca1 和Ca2（统称Ｃａ），产生一个电流Ia1 和Ia2（统称Ｉａ)。在Ｎｓ’绕组中同样产生安匝数，调节Ｄ４、Ｄ５、Ｄ６、使它们的安匝数与Nx 安匝数的余数相等。

ｕｆ＝（Ｃｓ／Ｃｆ）ｕ　　.....（５）

通过Ｎｓ’绕组电流为：

Ｉａ＝ｊｕｆωＣａ　　.....（６）

将（５）代入（６）式：

Ｉａ ＝ｊｕωＣｓ（Ｃａ／Ｃｆ）　　.....（７）

这就意味着，安匝数被（Ｃａ／Ｃｆ）的比率所缩小。

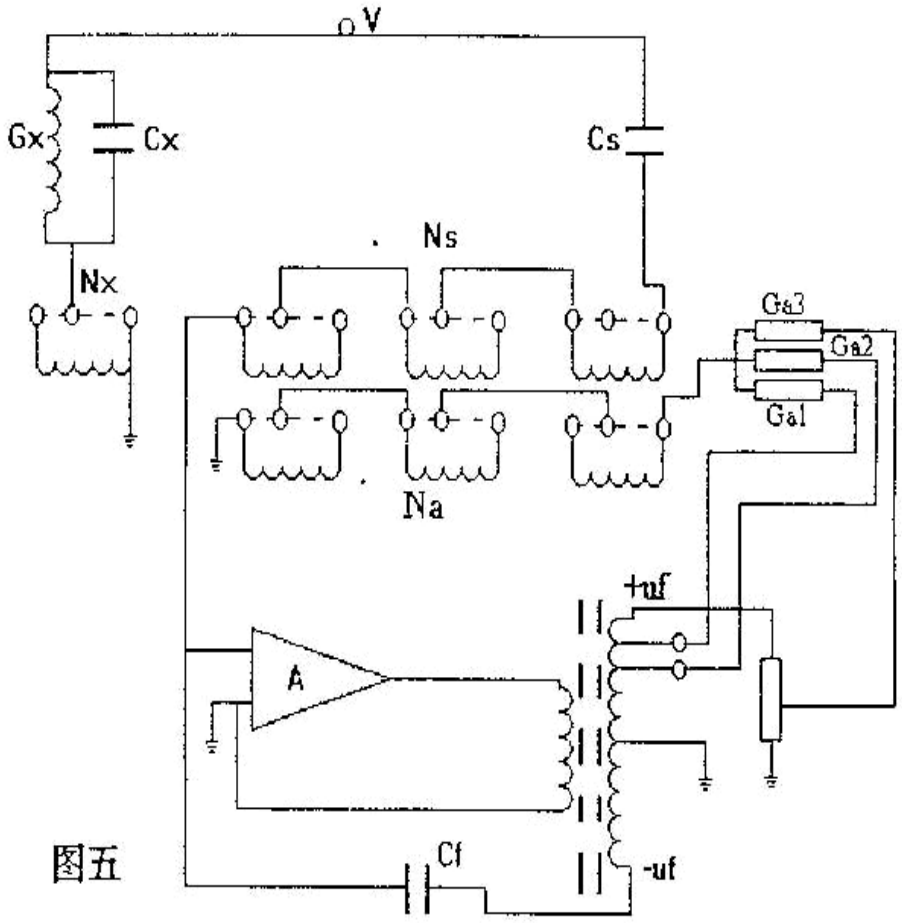
整个电容的平稳等式为：

Ｃｘ＝（Ｃｓ／Ｎｘ）〔Ｎｓ＋（Ｃａ／Ｃｆ）Ｎｓ′〕　　...（８）

使Ca/Cf 设计为一适当的十进值，等式（８）中的Ｎｓ′项成为Ns 较低项，这样使电桥具有六读数。

(2)介质损耗正切值ｔｇδ的测量。

被测电容损耗的等值电导Ｇx 的测量， 是通过前述运算放大器对电导Ｇ注入一个同相电流(见图５)，在Na 绕组中产生的安匝数与Nx 绕组的安匝数平衡，而且Ga 选择适当的阻值，使ｔｇδ在各个测量频率下直接读数。



图五

注入Ga的电流为 Ｉｇａ＝αｕｆＧａ .....（９）

式中α是运算放大器输出变压器的十进抽头是Ｕｆ电压的系数，将（５）式代入（９）式得到：

Ｉｇａ＝ｕ（Ｃｓ／Ｃｆ）αＧａ .....（１０）

被测的有功电流： Ｉｇｘ＝ｕＧｘ .....（１１）

当平衡时，检测绕组的磁通为零，安匝平衡则：

ＩｇｘＮｘ＝ＩｇａＮａ .....（１２）

将（９）和（１）式代入：

ｕＧｘ Ｎｘ＝ｕ（Cs/Cf）αＧａＮａ

Ｇｘ＝αＧａ（Cs/cf）(Na/Nx) .....（１３）

在实际测量中希望得到ｔｇδ值，而ｔｇδ＝Ｇｘ／（ωＣｘ）

由（４）和（２）式得：

ｔｇδ＝（αＧａＮａ）／（ωＣｆＮｓ).....（１４）

结构上使Ns和Na绕组的转换开关连动，并使Na/Ns比率值保持为一常数，本电桥此常数为0.1，选择适当的ＣＦ值和在各测试频率相对应时的Ga值，这样 tg δ 就只与α有关，通过调节加在电导Ｇ上的Ｕｆ 电压系数α来平衡被测tgδ，如此可在α上直接读得被测tgδ值。

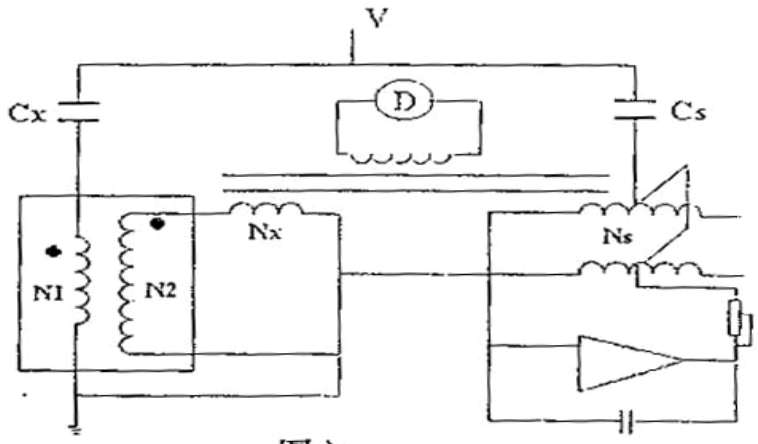
本电桥加在电导Ga1及Ga2上的电压系数α1,α2为变压器上十进抽头，而加在Ga3上的电压系数α3为一多圈电位器， 在读数计数结构上此电位器有三位读数，在调节小tgδ平衡时显得更为方便。

本电桥运算放大器输出电压除＋uf 之外还有－uf，是完全对称的，通过一只转换开关使α1,α2,α3 全部接在－uf 端，这样能读得－tgδ值，当被测的 tg δ值小于 标准电容器的 tgδ值时，能很方便地读到被测 tgδ值，这对于比较二个标准电容器时是有必要的。

(3)外接精密电流互感扩大量程。

电桥电容比值最大为１０００：１，当测大电容（如电力电容器）时这一比率值显得不够，则可外接精密电流互感器（Ｃ、Ｔ），共原理示于图６，它的电容平衡等式为：

$$Cx = Cs(Ns/Nx)(N2/N1) \qquad .....(15)$$



图六

（N2/N1）为外接电流互感器的变比值，tg δ值及电容比值仍然是直读而电流 互感器的比差及相差是测量电容及 tgδ的附加误差，应尽量选用高精度的电流互感 器以提高测量准确度。当选用１０００：１（Ｎ2：Ｎ1）的电流互感器，电容比值 最大可达１０６：１，因此当标准电容电容量为１０００ｐＦ时， 最大被测电容量 可达１０００ｕＦ，而它的最大电流可达１０００Ａ。

在选用电流互感器的抽头时，应考虑到被测电容量，例被测电容为１００ｕＦ 时，而标准电容为１００ｐＦ时， 应选用１０００：１０的电流互感器（其变比为 １００：１）被测端电流互感器绕组，由于通过较大的电流，一端应接大地，切勿 通过电桥接线柱再接大地，否则将引起误差。

(4)引线阻抗的补偿

当测量大电容时，电容的阻抗值很小，引线电阻、接触电阻等不能再被忽略，例对于３００ｕＦ电容器它的阻抗在５０Ｈz 时约为１０．６Ω，尚若引线电阻为３ｍ Ω,将会产生约为３×１０-4 的 tgδ附加误差,这对于高精度测量电力电容器，尤其 是测量薄膜电容器（它的 tgδ地１０-4 数量级）是不允许的，必需采用电流端电位 端的四端法测量消除电阻的影响。

本电桥引线补偿的原理示于图７

其中Ｚ１、Ｚ２－－被测Ｃx 电流端引线阻抗

Ｚ３、Ｚ４－－被测Ｃx 电位端引线阻抗

由图中可见阻抗Ｚ１被认为是电源阻抗的一部分，因此可忽略它。又由于通

过 Cs 的电流相当小，所以Z 3 的影响也可忽略。

如果放大器A具有高的输入阻抗和低的输出阻抗特性，则当电桥平衡时：

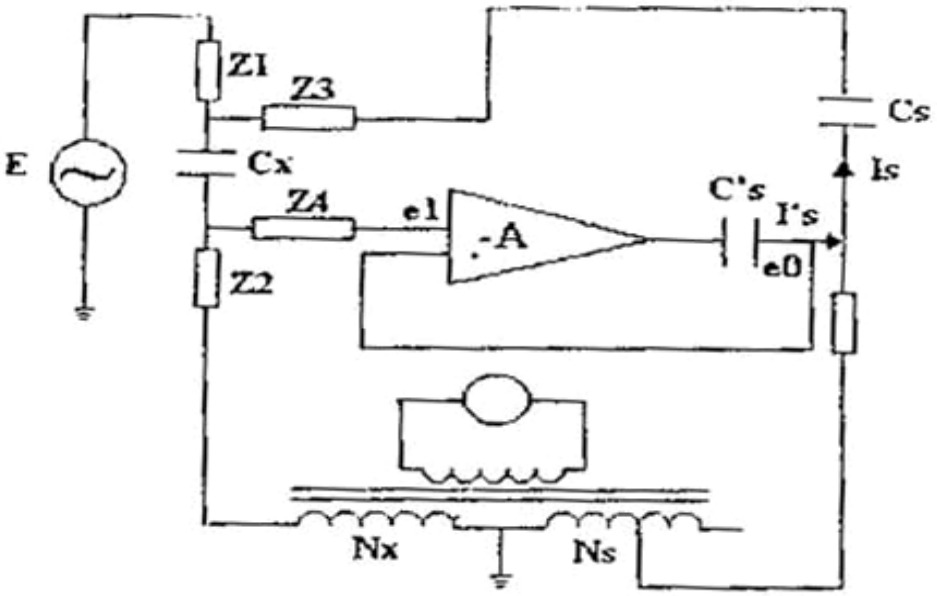
$$I_x N_x = (I_s + I_s') N_s$$

$$(E - e_1) j\omega C_x N_x = (E - e_2) C_s N_s + (e_0 - e_2) j\omega C_s' N_s$$

$$C_x = C_s N_s / N_x \{[E - e_2 (1 + C_s'/CS) + e_0 C_s'/CS] / [E - e_1]\} \quad \text{.....(17)}$$

与（4）式相比较，需使（17）式中后面一项等于1。即：

$$e_0 = -e_1 (C_s / C_s') + e_2 (1 + C_s / C_s')$$



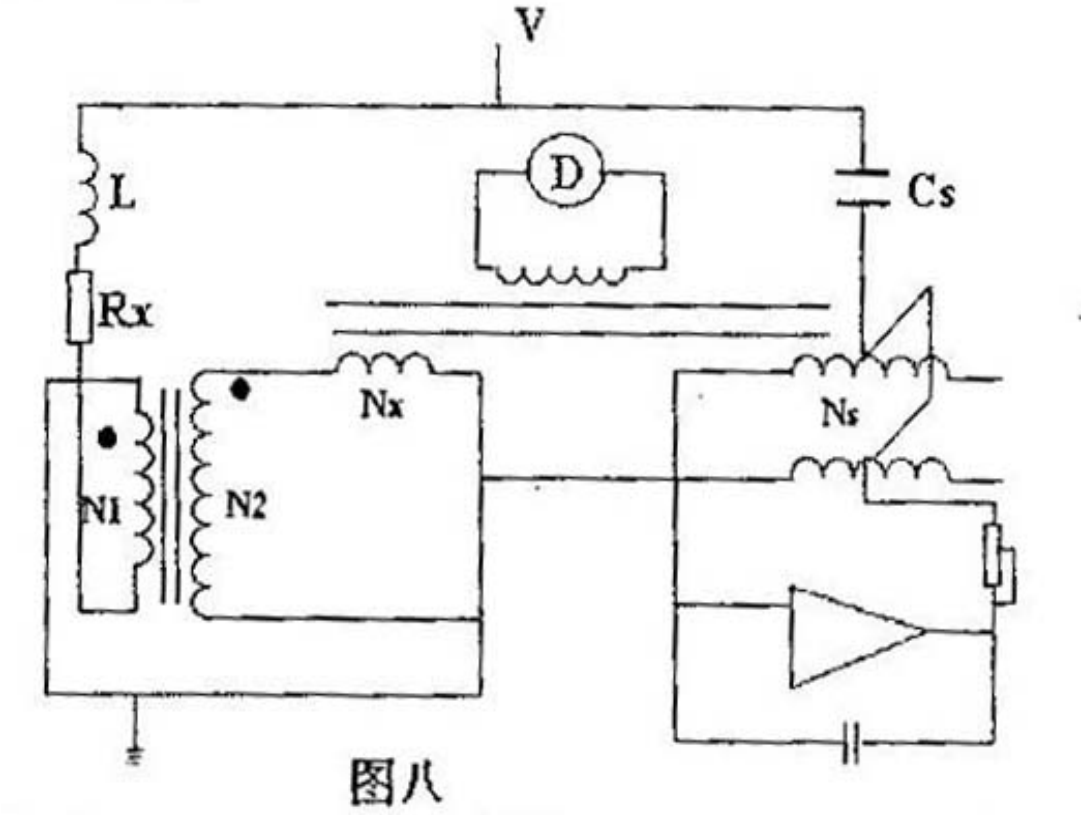
图七

因此只要满足（18）式条件，即能消除引线引起的误差，它实际上是一只双相输入的运算放大器，使（18）式成立必需使Cs’可调， 一个可调的电容器比 较麻烦，实际电路中采用电阻作为可调元件，一般在测量大电容是标准电容Cs 总 选择1000PF或100PF，因此C’s 也有二档100PF及1000PF ，这样使电阻可调范围比较小一些。

4-3 电感的测量

(1)概述

本电桥配上外接电流互感器，使通过电流互感器初级绕组N1 的电流相反，可测量电抗器的电感值及Q值，其原理图示于图 8 。



图八

当外接电流互感器反相连接时，通过它的感性与通过标准电容器的容性电流在 相位上同相，调节等值电容比率Ｃｘ／Ｃｓ读数盘能使电桥平衡，而通过被测电抗器的电流有功分量也被反相了，因此它的等值损耗值为负值，即在平衡有功分量时应将图１中第１５项选择开关置于“－”。

(2)计算方法

电感值：平衡时电感值是以Cx/Cs盘的等值电容Ｃｘ来表示，而Ｃｘ从（１６）式整理后得到：Ｃｘ＝Ｋ×ｎ×（Cx/Cs读数）×Ｃｓ

其中Ｋ－－电桥倍率读数

ｎ－－外接电流互感器比率值N2/N1（见图６）

Ｃｓ－－标准电容器容量

Ｃｘ／Ｃｓ－－电桥电容比读娄值

若令　Ｍ＝Ｋ・ｎ

ｒ＝Cx/Cs 读数值

则Ｃｘ＝Ｍ・ｒ・Ｃｓ　　.....（１９）

Ｃｘ的等值电抗等于被测电抗器电感的电抗值

即　ＸＬｘ＝ＸＣｘ

ωＬｘ＝１／ωＣｘ　　.....（２０）

以（２０）式代入（１９）式：

ωＬｘ＝１／ωＭｒＣｓ

Ｌｘ＝１／ω２ＭｒＣｓ　　.....（２１）

（２１）式即为平衡读数后的计算电感值的公式，电容比 ｒ 的读数的准确度与电容电桥相同，但在计算电感值时与供电频率有关。

(3)品质因数“Ｑ”：

在平衡时被测电感的导纳是以等值电容的导纳来表示（并考虑到电流反相）

$$G+j\omega C=-1/(Rx+j\omega L)$$
$$=-Rx/(Rx^2+\omega^2L^2)+j\omega L/(Rx^2+\omega^2L^2)$$

分开实部及虚部：

$$G=-Rx/(Rx^2+\omega^2L^2) \quad .....(22)$$
$$\omega C=\omega L/(Rx^2+\omega^2L^2) \quad .....(23)$$

（２２）式与（２３）式相除：

$$G/\omega C=-Rx/\omega L \quad .....(24)$$

而损耗角正切值：　$tg\delta=G/\omega C$

品质因数：　$Q=\omega L/Rx$

代入（２４）式：　$Q=-1/tg\delta$ .....（２５）

此即为Q值计算式，电桥ｔｇδ读数倒数值取负即为Q值。

4-4 内部数据处理

(1)硬件原理

数据通过与测量调节开关同步采样，从而避免了采样和实际测量之间的误差。电路上采用了电子模拟开关，分别对每个调节盘所处在的位置进行采样，并通过高速 A/D 转换器件,将调节盘的位置输入计算机,再由软件对数据进行处理，并将计算结果在显示屏上显示出来。而且根据需要还可将测量结果打印出来。打印单上包括本电桥的型号、编号、测试结果。

(2)软件

软件根据硬件所提供的信号，进行译码，使计算机能知道每个调节盘目前所处的位置，然后根据公式，对当前的数据进行处理，数据处理采用了浮点数运算，从而确保了计算精度。最后再将处理的结果转换成人可以看懂的信号，通过硬件显示出来。整个软件容量大约为 4K。

第五章 仪器成套性

1. ＫＭＳＢ－３０型高压电桥装置　1台
2. 电源线　1根
3. 测量用导线　6根
4. 专用接线盒　2只
5. 电桥使用说明书　1份
6. 小型打印机使用说明书　1份

备注：可供配套附件（按用户需要订货供应）

1. ＫＭＳＢ３０－３型量程扩展器（最大比率１０００：１）
2. 各类标准电容。包括不同电压等级及不同的电容量。
3. ５ＫＶＡ以内的调压电源。
4. 各类升压变压器。

第六章 保管及免费修理期限

本电桥为高精度实验室高压电桥，应注意保管，其环境温度为 0～+40℃，相对湿度不超过８５％，且在空气中不应含有足以引起会腐蚀的有害物质。

产品自制造厂发货日期起１８个月内，当用户在完全遵守使用说明书中所规定的使用及保管规则下，发现产品质量问题和不能正常工作时，制造厂应负责免费给予修理或更换。